ACADEMIA ROMÂNĂ

INSTITUTUL DE MECANICA SOLIDELOR

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

CONTRIBUȚII LA ELABORAREA STRATEGIILOR DE CONTROL HIBRID FORȚĂ-POZIȚIE PENTRU CONDUCEREA ROBOȚILOR MOBILI

COORDONATOR: Prof. Dr. Ing. LUIGE VLĂDĂREANU

DOCTORAND: Ing. IONEL ALEXANDRU GAL

Bucureşti

2013

Mulțumiri

Doresc să mulțumesc domnului Profesor dr. ing. Luige Vlădăreanu pentru îndrumarea şi susținerea acordată, fără de care nu ar fi fost posibilă finalizarea şi realizarea acestei teze.

Aduc mulțumiri Profesorului dr. Florentin Smarandache, de la University of New Mexico - Gallup SUA, fondatorul logicii neutrosophice şi autorul teoriei DSm, pentru ajutorul acordat în dezvoltarea conceptului logicii neutrosophice.

Multumesc Profesorului Hongnian YU, de la Bournemouth University UK, coordonatorul proiectului FP7 IRSES, RABOT „Real-time adaptive networked control of rescue robots" şi Profesorului Mingcong Deng, de la Tokyo University, pentru colaborarea în articole publicate sau înregistrate pentru a fi publicate în comun.

Mulțumesc domnului Conf. dr. ing. Ovidiu Ilie Sandru de la Universitatea Politehnica Bucureşti, pentru ajutorul acordat la capitolele de matematică aplicată.

Mulțumesc Profesorului Radu Ioan Munteanu de la Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, pentru colaborare în publicarea a numeroase articole şi susținerea invențiilor la expozițiile naționale şi internaționale.

Mulțumesc Profesorului Cai Wen, fondatorul unei noi ştiinte în rezolvarea problemelor contradictorii „Extenics", Profesorului Yang Chunyan, director al Extenics Research Institut şi Profesorului Li Weihua, de la South China University of Technology, Guangzhou, China, pentru colaborare în realizarea invenției „Method and Device for Hybrid Force-Position extended control of robotic and mechatronic systems".

Multumesc Profesorului Feng Gao, Profesorului Xianchao Zhao, Profesorului Chenkun Qi de la Shanghai Jiao Tong University, Profesorului Wangbo Wang de la Yanshan University şi Profesorului Zeng-Guang Hou de la Institute of Automation Chinese Academy of Sciences China, pentru colaborarea în proiectul european FP7 IRSES, RABOT „Real-time adaptive networked control of rescue robots".

Şi nu în ultimul rând tuturor prietenilor şi colegilor pentru susținere şi încurajare în finalizarea tezei.

Multumesc familiei mele care mi-a acordat toată susținerea pe parcursul programului de doctorat.

Drd. Ing. Ionel Alexandru Gal

CUPRINS

Pag / ... Pag teză

Introducere

Scopul principal al lucrării este de a realiza o metodă nouă şi inovativă de control hibrid forţă-poziţie care se poate adapta în timp real, la orice tip de situaţie şi eveniment pe care robotul le poate întâlni în mediul de lucru. Pentru aceasta, în faza de dezvoltare a controlului hibrid se aleg mai multe legi de control, la care se asociază modul de utilizare a acestora, urmată de definirea a câte unui set de legi de control în timp real pe care robotul le va utiliza îm funcţie de situaţia întâlnită în mediul de lucru, de stările şi zonele de incertitudine pentru care se vor defini şi folosi legile şi metodele de control cu un spectru larg de aplicabilitate.

Prima abordare utilizată în cercetările realizate, a constat în aplicarea metodei DHFPC [41, 62, 69, 72, 161] a Profesorului Luige Vlădăreanu în controlul dinamic hibrid-forţă poziţie, care are ca scop principal îmbunătăţirea stabilităţii mişcării roboţilor mobili păşitori prin dezvoltarea a şapte bucle de control, cu acţiune distributivă în funcţie de mediul în care se deplasează robotul, luând în consideraţie compensarea ZMP, mişcările predictibile, amortizarea la aterizare a piciorului robotului, etc. Cercetările realizate, analizând conceptul dezvoltat de metoda Profesorului Luige Vlădăreanu în controlul dinamic hibrid forţă-poziţie [7] în care s-a aplicat logica neutrosophică, fondată de Profesorul Smarandache de la Universitatea din NewMexico SUA şi teoria Dezert-Smarandache (DSm), au condus la dezvoltarea unei funcţii de comutare originală, bazată pe metoda DHFPC a Profesorului Luige Vlădăreanu [41, 62, 69, 72, 161] şi logica neutrosophică a Profesorului Smarandache [8, 76, 77]. Deoarece datele de intrare într-un sistem de control pot fi de multe ori ambigue sau contradictorii, s-a utilizat această nouă tehnică de control, care foloseşte probabilităţile de adevăr, falsitate şi incertitudine, calculate prin procedeul de modelare a datelor brute recepţionate de la anumiţi senzori cu rolul de observatori ai sistemului.

Pentru a îmbunătăţii şi creşte performanţele controlului hibrid forţă-poziţie, s-a dezvoltat o nouă arhitectură de control în timp real hibrid forţă/poziţie, îmbunătăţită cu logica neutrosophică, care reuşeşte să determine pentru fiecare sarcină sau schimbare a datelor robotului şi de mediu, legea de control necesară pentru controlul fiecărui grad de libertate şi axă de mişcare a robotului. În acest sens, logica neutrosophică acţionează ca o lege de comutare determinând parametrii matricei ***S*** de dimensiune **n**x**n**, specifice controlului hibrid forţă/poziţie. Mai mult, în locul unor reguli stricte de comutare, se pot defini condiţii de tranziţie a robotului de la o stare la alta, stări care pot fi îndeplinite în funcţie de datele de intrare primite de la toţi senzorii robotului desemnaţi ca observatori ai legii de comutare neutrosophică. Astfel, controlul neutrosophic are rolul de a lua decizia corectă de comutare în timp real a legilor de control de mişcare a robotului mobil. Rezultă o nouă metodă de control hibrid forţă/poziţie în timp real mult îmbunătăţită, cu performanţe ridicate în ceea ce priveşte stabilitatea pe terenuri denivelate şi nestructurate, care are ca fundament metoda de control dinamic hibrid forţă-poziţie DHFPC, la care se adaugă interfeţe cu legi de control specifice mişcării robotului într-un mediu constrâns, cum ar fi logica neutrosophică pentru decizia de comutare optimă, metoda de control la alunecare, contactul cvasi-static în proiecţie 3D, etc. Se asigură posibilitatea de a schimba legile interne de control al fiecărei articulaţii/grad de libertate într-un mod dinamic, pentru ca robotul să se poată deplasa în mediul de lucru, în ciuda perturbaţiilor, incertitudinilor şi a acţionărilor exterioare aspura acestuia. Noua metodă de control hibrid în timp real este superioară prin performanţe ridicate ale stabilităţii roboţilor pe terenuri denivelate şi nestructurate, caracterizându-se prin răspuns rapid şi robusteţe la constrângerile care apar în mediul robot, adaptabilitate în ocolirea obstacolelor şi în realizarea de acţiuni în cooperare cu alţi roboţi, fiind în acelaşi timp mai eficientă în tratarea problemelor de incompatibilitate între obiectivele robotului şi legile de control utilizate. Aceste performanţe net superioare unor cercetări actuale publicate în reviste recunoscute, indexate BDI sau ISI, sunt relevate în prezenta lucrare prin conceptele originale, rezultate obţinute în urma unor simulari şi experimentări, recunoscute pe plan naţional şi internaţional prin publicarea rezultatelor cercetarilor în conferinţe internaţionale la Harvard, Houston, Paris, Bucureşti, în reviste indexate în BDI şi ISI, dar şi prin premii naţionale şi internaţionale, medaliii de aur acordate la Expoziţiile Internaţionale din Geneva 2010, Moscova 2010, Bucureşti 2010, Varşovia 2009.

Îmbunătăţirile aduse controlului hibrid forţă/poziţie, se încadrează în domeniile de preocupare a numeroase colective de cercetare ştiinţifică din universităţi şi institute de cercetare din întreaga lume [160-172], dovedite de studiile de analiză realizate pe numeroase lucrări de cercetare ştiinţifică valoroase, publicate în ultimii ani în reviste cu vizibilitate internaţională, indexate BDI sau ISI, de

echipe de cercetare cu renume mondial [135, 137, 138-142, 144, 145, 147, 151, 155, 156, 160, 161, 164, 166, 168, 169, 171, 172].

Pentru a obține îmbunătățirile aduse controlului hibrid forță/poziție, s-au realizat mai multe cercetări în colaborare cu universități din străinătate precum Universitatea din Gallup New Mexico, SUA; Universitatea Autonomă din Mexico City, Mexic şi Universitatea din Houston SUA. Importanța cercetărilor realizate, ca de altfel şi corectitudinea lor, a fost validată prin punerea lor în dezbatere publică în cadrul a numeroase manifestări ştiințifice naționale şi internaționale, prin publicarea lor în reviste ştiințifice prestigioase sau prin obținerea de brevete de invenție naționale şi europene.

De menționat, în anul 2011 a fost încheiat un contract de colaborare cu Profesorul Florentin Smarandache, fondatorul teoriei neutrosophice şi autorul teoriei Dezert Smarandache (DSm), de la Universitatea din Gallup statul New Mexico SUA, cu contribuții semnificative pe care le-am adus în această teză de doctorat prin aplicarea teoriei DSm în robotică şi dezvoltarea conceptului de logică neutrosophică în controlul sistemelor dinamice. Logica neutrosophică are o importanță deosebită în cercetarea ştiințifică deoarece pleacă de la conceptele logicii fuzzy şi o extinde introducând şi folosind elementele de incertitudine şi contradicție extrem de necesare în modelarea tuturor sistemelor. Logica neutrosophică are numeroase aplicații în diferite domenii de cercetare cum ar fi matematică, chimie, biologie, etc. În această lucrare sunt dezvoltate metode şi concepte originale care permit obținerea de performațe ridicate în controlul mişcării şi stabilității roboților păşitori prin aplicarea logicii neutrosophice şi a teoriei DSm.

Lucrarea de față este împărțită în 10 capitole, din care primele 7 conțin lucrarea în sine, împreună cu un capitol de contribuții originale şi unul de concluzii. Ultimele 3 capitole conțin lista de lucrări publicate ale autorului, bibliografia utilizată în studiul de cercetare, anexele cu grafice, figuri şi algoritmi care nu au putut fi introduşi în conținutul lucrării pentru înțelegerea cu uşurință a conceptelor dezvoltate.

Cercetări experimentale asistate de calculator; simularea şi validarea modelelor matematice elaborate

În acest capitol se prezintă structura robotului mobil păşitor utilizat în simularea şi demonstrarea metodelor şi algoritmilor de control dezvoltați şi îmbunătățiți prin metode originale.

S-a ales structura robotului mobil păşitor hexapod, prezentat schematic în figura 5.1.1 care conține 18 grade de libertate, toate de rotație, fiecare picior al robotului având câte 3 DOF.

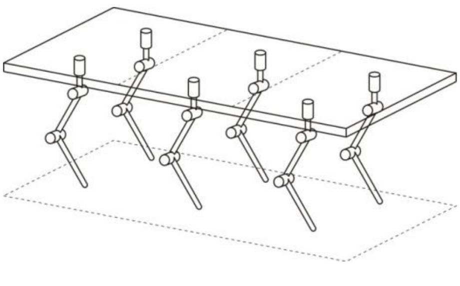


Figura 5.1.1 - Robotul mobil păşitor hexapod

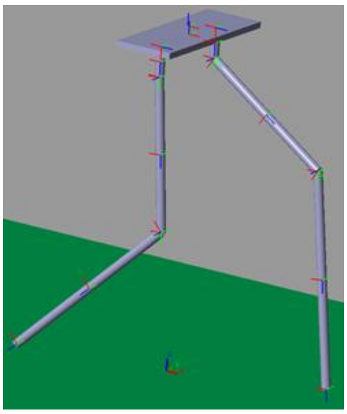


Figura 5.1.2 – Robotul mobil păşitor biped(A. Gal)

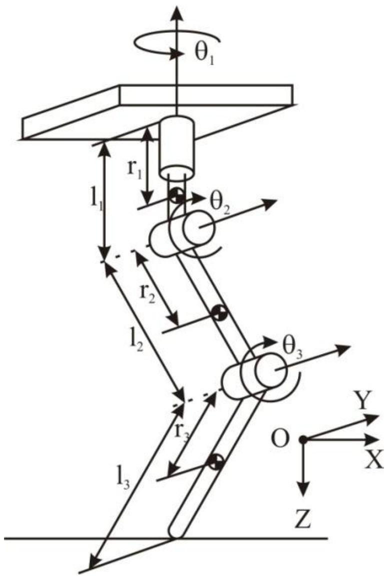


Figura 5.1.3 Structura cinematică a unui picior al robotului mobil biped/hexapod

Plecând de la figura 5.1.1 şi 5.1.2, se alege un singur picior al robotului, pentru a detalia structura cinematică a acestuia, precum şi alegerea axelor de rotație a articulațiilor, în figura 5.1.3.

Logica Neutrosophică în determinarea contactului cu suprafața de sprijin

Acest capitol prezintă contribuțiile originale care utilizează logica neutrosophică [8, 76, 77] şi teoria DSm pentru a realiza o metodă originală de percepție a mediului de deplasare a roboților mobili păşitori prin intermediul senzorilor care acționează ca observatori.

Logica neutrosophică este considerată a fi un cadru general pentru unificarea majorității logicilor existente, iar conceptul de bază este reprezentat de caracterizarea fiecărei afirmații într-un spațiu tridimensional format din procentajele de adevar (T), falsitate (F) şi nedeterminare (I) a respectivei afirmații [75].

Teoria Dezert Smarandache, pe scurt DSmT, este o teorie al raționamentului plauzibil şi paradoxic care a fost dezvoltată pentru a se putea folosi surse de informații imprecise, incerte sau conflictuale. Această teorie se foloseşte cu preponderență acolo unde alte teorii eşuează datorită stărilor conflictuale dintre sursele de informații, cum ar fi urmărirea unei traiectorii, supravegherea prin satelit, analiza unei situații, analiza de imagini, recunoaştere de obiecte, robotică, medicină, biometrică, etc.

În urma aplicării metodei clasice DSm, se obțin patru categorii de date, valori de certitudine a **Adevărului** şi **Falsității** pentru anumite evenimente, valori ale **Incertitudinii** pentru respectivele evenimente, şi nu în ultimul rând valorile **Contradicției** dintre valorile furnizate de către observatori.
Metoda vizează controlul mişcării roboților de salvare pe terenuri denivelate şi nestructurate cu referire expresă la roboți de salvare RABOT din proiectul FP7, IRSES „Real-time adaptive networked control of rescue robots". Se presupune că structura robotului mobil păşitor este una simplă, iar pentru fiecare picior avem trei grade de libertate pentru poziționarea în spațiul 3D. Pentru un asemenea robot mobil, coborâtul unei scări despre care robotul nu cunoaşte structura, forma şi poziția fiecărei trepte în parte, este o adevărată provocare din punct de vedere al generării referinței de poziționare a picioarelor. De aceea se folosesc senzori pentru a detecta fiecare treaptă pe care robotul trebuie să calce. Senzorii utilizați ca observatori în teoria DSm sunt câte unul de proximitate şi unul de forță, amplasați pe talpa fiecărui picior al robotului mobil păşitor. Prin intermediul celor doi observatori se va determina dacă piciorul robotului este sau nu în contact cu suprafața de sprijin.

Aplicand teoria prezentată, am obținut o diagramă logică, ce prezintă modul în care decizia neutrosophică este obținută. Utilizând diagrama logică, algoritmul alege metoda de control (cinematică sau dinamică) va controla mişcarea robotului mobil păşitor la un anumit moment de timp.

Contribuțiile originale prezentate în această secțiune reprezintă utilizarea logicii neutrosophice în conceptul metodei de comutare dar şi în diagrama logică utilizată în faza de deneutrosophicare a datelor calculate şi luarea deciziei.

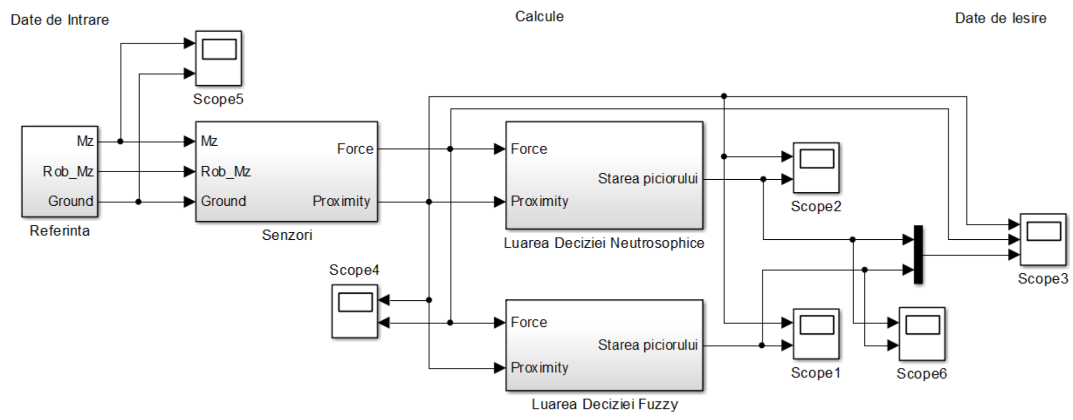


Figura 4.3.4 – Sistemul de comparație a metodelor de comutare neutrosophică şi respectiv fuzzy

S-a dezvoltat o simulare care să fie suficient de simplă dar şi complexă pentru ca diferența dintre metode să fie cât se poate de clară.

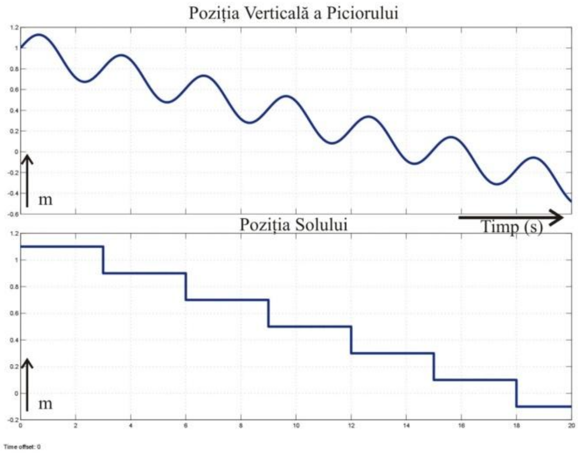


Figura 4.3.7 – Datele de intrare ale sistemului de comutare

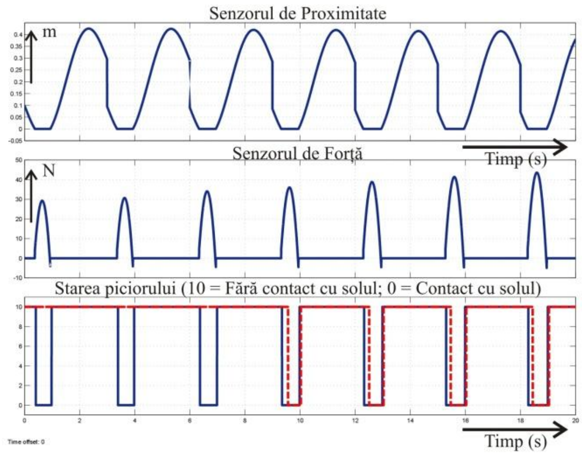


Figura 4.3.9 - Ieşirea sistemului de comutare în paralel cu datele celor doi senzori

Figura 4.3.7 prezintă graficele datelor de intrare reprezentate de poziția pe verticală a tălpii piciorului, față de un punct fix în spațiu. De asemenea este reprezentat în cea de a doua diagramă graficul poziției verticale a suprafeței de sprijin față de acelaşi punct în spațiul operațional.

Folosind sistemul de comutare original care foloseşte teoria DSm, se observă comparativ cu cel bazat pe logica fuzzy (figura 4.3.9) că acesta determină mult mai eficient stările de contact cu suprafața de sprijin în funcție de datele furnizate de cei 2 observatori, față de rezultatele comutării fuzzy.

Contribuția cea mai importantă din acest capitol este conceperea, dezvoltarea şi experimentarea unei metode de comutare originale în controlul roboților mobili păşitori utilizând logica neutrosophică, îmbunătățind percepția mediului în care aceştia se deplasează prin detecția sigură a stărilor în care se află robotul. Analizele comparative au demonstrat îmbunătățirea performanțelor mişcării robotului în medii denivelate şi nestructurate în raport cu metodele fuzzy actuale.

În concluzie, metoda de comutare bazată pe logica neutrosophică, reuşeşte să facă față testelor de comutare şi luare a unor decizii de detecție a stărilor unui sistem, în timp real, şi cu erori aproape nule. În schimb, este necesară o condiție suplimentară de menținere a acestor stări pentru un timp Δt, pentru ca sistemul să nu prezinte efectele nedorite ale fenomenului de *chattering*, simulând comportamentul unui sistem cu histerezis.

Contribuțiile aduse domeniului roboticii prezentate în acest capitol au avut ca bază de pornire stadiul actual al cercetărilor în acest domeniu, precum şi de cercetările realizate în colaborare cu Profesorul Luige Vlădăreanu, Profesorul Florentin Smarandache, SUA, Profesorul Hongnian Yu, UK, Profesorul Ovidiu Ilie Şandru şi Profesorul Radu I. Munteanu. Ca urmare a acestor colaborări, s-au elaborat strategii de control hibrid forță-poziție originale, pentru conducerea roboților mobili păşitori. Aceste strategii de control au fost modelate mai întâi din punct de vedere al relațiilor matematice care stau la baza oricărei modelări a sistemelor de control şi mecatronice. Ulterior, aceste relații matematice au fost simulate, utilizând programe software avansate de experimentare prin simulare a roboților mobili păşitori şi a legilor de control dezvoltate, dovedindu-se utilizatea contribuțiilor aduse în controlul roboților mobili păşitori, prin comparații cu rezultate a diferite echipe de cercetare cu renume mondial.

Controlul mişcării la alunecare, proporțional-integrativ-derivativ cu amplificare fuzzy

Acest capitol prezintă în detaliu controlul dinamic al mişcării la alunecare aplicat unui picior al robotului mobil păşitor, precum şi contribuțiile aduse acestei metode de control. Această strategie de control utilizată (SMC - Sliding Motion Control), este neliniară, variabilă şi robustă, dar este şi capabilă să controleze diferite clase de sisteme cu diferite clase de incertitudini, incluzând sistemele neliniare, sistemele MIMO precum şi sisteme discrete în timp [80, 81].

Folosind relațiile descrise în acest capitol, s-a dezvoltat o simulare Matlab Simulink pentru a testa metoda de control la alunecare care utilizează contribuțiile propuse. Printre acestea se numără

metoda fuzzy utilizată pentru ajustarea parametrilor PID-SMC şi calcularea parametrilor SMC pentru creşterea preciziei de poziționare. De asemenea, s-a observat faptul că dacă sistemul prezintă erori mari în timp, datorate unor perturbații ale semnalului de eroare, partea integrală se propagă în sistem, rezultând o eroare medie mai mare.

$$s = \dot{e} + \lambda_1 e + k * \lambda_2 \int_0^t e dt \quad (5.2.35)$$

Această nouă relație care determină suprafața de alunecare corespunde condițiilor de stabilitate din relația (5.2.32) şi reprezintă una din contribuțiile originale care îmbunătățesc controlul mişcării la alunecare.

După realizarea simulărilor, s-au obținut datele prezentate în cele ce urmează, iar figurile 5.2.7 şi 5.2.10 prezintă rezultatul acestor simulări. Datele prezentate reprezintă controlul ultimelor 2 articulații ale unui picior al robotului mobil păşitor deoarece prezintă cel mai concludent îmbunătățirile introduse. Primul grafic prezintă semnalele de referință şi urmărire a sistemului. Dorind să evidențiem comportamentul robust al sistemului s-au introdus o serie de perturbații în sistemul de referință precum şi în cel de simulare a robotului. Aceste perturbații introduc valori de amplitudine mare constantă la diferite momente de timp (secunda 4, 6 şi 8 a semnalelor referință) dar şi un cuplu de rezistență aplicat motoarelor din articulații care variază în timp, după o sinusoidă de amplitudine 0,5Nm.

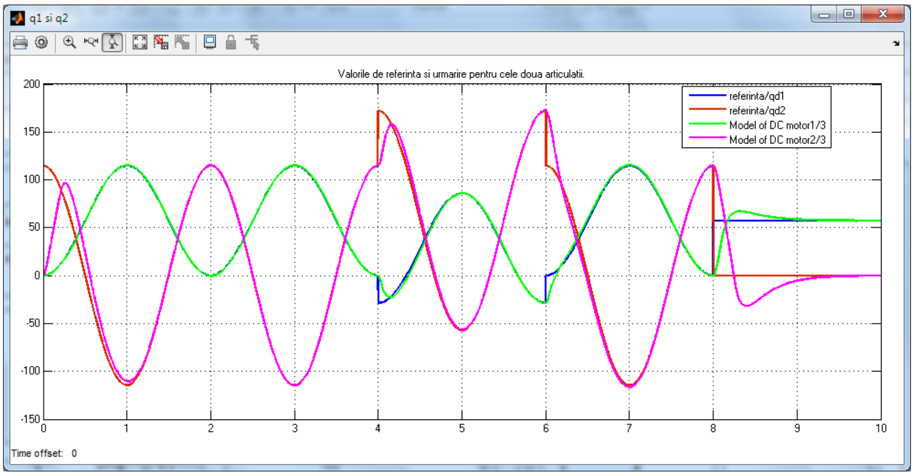


Figura 5.2.7 – Poziționarea articulațiilor în raport cu referința

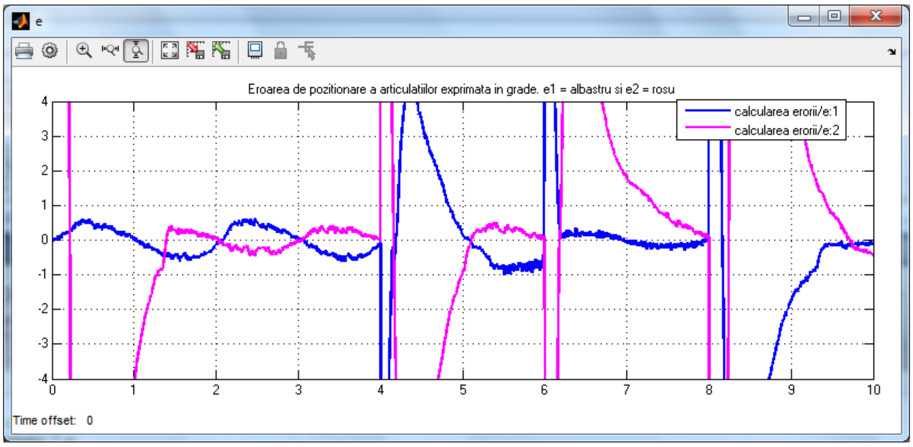


Figura 5.2.10 – Eroarea de poziționare pentru cele două articulații, mărită

Se observă, că noua lege de control Fuzzy-PID-SMC îmbunătățită cu logica fuzzy şi adăugarea parametrului k, prezintă o eroare de poziționare îmbunătățită precum şi o viteză mai mare, de a ajunge în vecinătatea referinței după apariția perturbațiilor, crescând semnificativ robustețea metodei de control.

Prima contribuție adusă acestei metode de control reprezintă logica fuzzy utilizată pentru calcularea amplificărilor. Această metodă presupune dezvoltarea unei funcții care are la bază un tabel clasic de calculare fuzzy. Astfel, fuzificarea şi defuzificarea se face folosind o funcție special concepută pentru a controla un robot mobil păşitor şi printr-o simplă calculare a ieşirii în funcție de parametrii de la intrare, rezultând o optimizare a calculului în timp real pentru amplificările necesare.

O a doua contribuție o reprezintă introducerea parametrului „k” în interiorul calculării suprafeței de alunecare „s”, fără a afecta condiția de stabilitate. Prin acest parametru s-a reuşit reducerea erorii unghiulare în timpul funcționării, iar optimizarea calculării acestuia a condus la un control precis şi stabil, aşa cum a fost prezentat în rezultatele obținute. Mai mult, deoarece componenta integrală a controlului este redusă, suprareglajele sistemului de control sunt mult diminuate, îmbunătățind robustețea metodei SMC.

Controlul hibrid forță-poziție în conducerea unui robot mobil păşitor

Acest capitol al tezei de doctorat prezintă strategiile de control hibrid forță-poziție al roboților mobili păşitori elaborate în baza unor relații matematice. Relațiile prezentate, fac parte din lista de contribuții originale în domeniul conducerii roboților mobili pe care această lucrare le prezintă.

Una din contribuțiile principale prezentate în această teză este dezvoltarea unei scheme de control hibrid forță-poziție bazată pe controlul hibrid clasic [9] şi metoda Profesorului Luige Vlădăreanu DHFPC [41, 62, 69, 72, 161], în care selecția legilor de control care guvernează articulațiile robotului se face prin intermediul matricei de selecție, calculată în timp real de o lege de comutare originală bazată pe logica neutrosophică [8, 76, 77] şi teoria DSm [75, 79, 159]. Relația matematică care condiționează matricea de comutare S este cea din relația (4.1).

$$\sum_{i=1}^{n} Sp_i + \sum_{j=1}^{m} Sf_i = I_{nr_{DOF}} \tag{4.1}$$

unde, Sp_i şi Sf_i sunt matricele care desemnează legile de control în poziție şi respectiv în forță utilizate în conducerea robotului mobil, iar matricea unitate I_{nrDOF} are dimensiunea determinată de gradele de libertate care determină toate pozițiile cinematice ale robotului.

Schema de control propusă pentru îmbunătățirea controlului hibrid forță/poziție este prezentată în figura 4.2. Această diagramă de control hibrid forță-poziție, poate realiza controlul unei game ridicate de roboți, ale căror mediu de lucru este în continuă schimbare, permițând acestora să lucreze eficient şi stabil în condiții de incertitudine şi parametrii dinamici ai mediului de lucru, fără a fi necesară ajustarea legilor de control la fiecare schimbare a parametrilor exteriori sistemului.

Pornind de la cercetări realizate de Profesorul Luige Vlădăreanu [7, 37, 38, 56, 58, 59, 62, 63, 69, 72, 161, 163, 195], s-a dezvoltat noua schemă de control hibrid forță-poziție bazat pe controlul DHFPC şi care utilizează metoda originală de comutare realizată cu ajutorul logicii neutrosophice şi a teoriei DSm a Profesorului F. Smarandache [8, 75, 76, 77, 79, 159].

Pentru a demonstra validitatea noii metode de control hibrid forță-poziție elaborate, s-a implementat şi simulat schema de control hibrid, folosind o reprezentare simulată a robotului mobil păşitor, prezentat în capitolul 5.1. Rezultatul simulărilor îl reprezintă controlul unui robot mobil păşitor biped pentru care nu trebuie să ne gândim la problema răsturnării acestuia. Mai mult, s-au utilizat două metode de control a robotului la care s-au adus contribuții originale pentru optimizarea lor în conducerea roboților mobili păşitori. Aceste metode de control controlează robotul mobil păşitor folosind tehnici liniare bazate pe cinematica robotului şi pe regulatoare PID, iar a doua metodă conduce articulațiile folosind metoda dezvoltată Fuzzy-PID-SMC de control a mişcării la alunecare, pornind de la informații în spațiul operațional şi transformate în spațiul articulațiilor prin metode de calcul a cinematicii inverse.

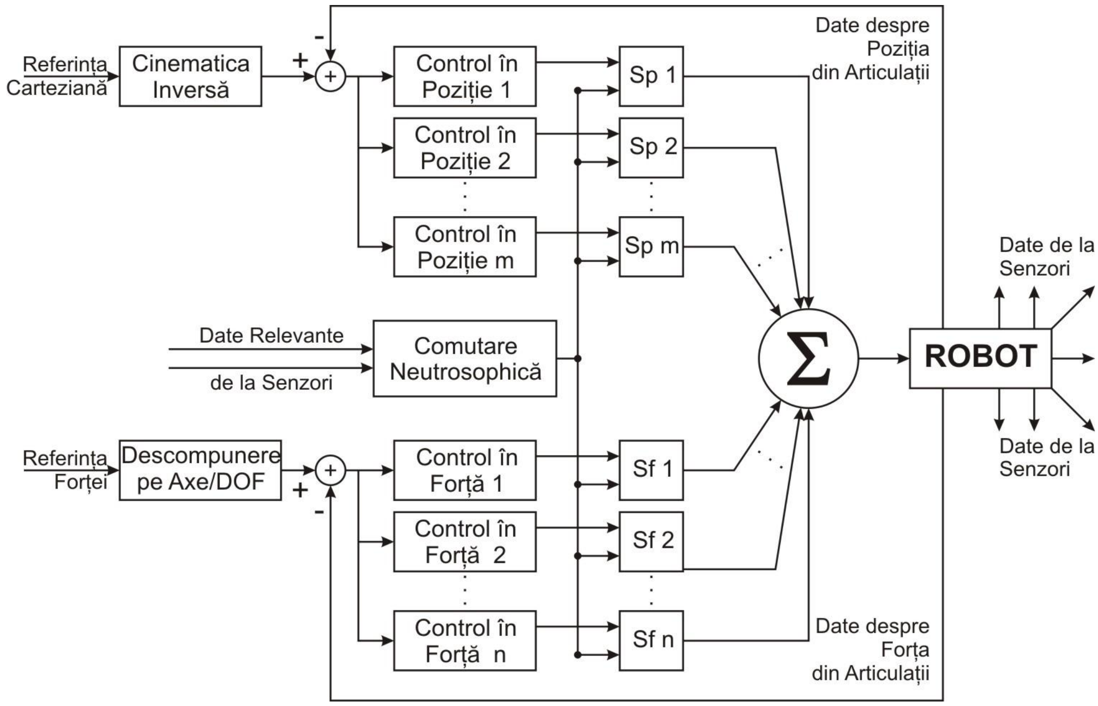


Figura 4.2 – Schema controlului hibrid îmbunătățit forță-poziție

Noua schemă de control hibrid forță-poziție din figura 4.2, este superioară celei originale prin faptul că beneficiază de un număr mai mare de legi de control care guvernează mişcările robotului în diferite momente de timp.

Pentru o mai bună înțelegere a mecanismului din spatele noului control hibrid forță-poziție îmbunătățit, s-a realizat schema de control din figura 4.2. Această diagramă de control este varianta particularizată a schemei de control hibrid îmbunătățit pentru două legi de control, care vor controla robotul mobil păşitor biped în cuplu, plecând de la o referință în poziție exprimată în coordonate Carteziene şi transformate de algoritmul cinematicii inverse în valori în spațiul articulațiilor.
Relația următoare exprimă legea de control a schemei hibrid forță-poziție îmbunătățit şi particularizat pentru cele două metode de control.

$$\tau_{ctrl} = S\left[\tau_{prev} + K_p\left(q_{ref} - q_{real}\right) - \omega_{real} - K_d \alpha_{real}\right] + \left(I - S\right)\left[SMC\left(\Delta q, s, K_{fuzzy}, Rob_{Dinamica}\right)\right]$$

Contribuțiile principale introduse în acest capitol sunt reprezentate de folosirea noii legi de control hibrid forță-poziție în conducerea roboților mobili păşitori pe terenuri accidentate precum şi simularea condițiilor de interacțiune a robotului cu mediul de lucru folosind ecuații de modelare a contactului elastic cvasi-static, a forțelor de frecare precum şi utilizarea librăriilor Matlab pentru simularea cât mai realistă a robotului mobil păşitor, aşa cum este prezentat în cele ce urmează.

Simularea robotului mobil păşitor în Matlab Simulink

Pentru realizarea structurii cinematice a robotului mobil păşitor s-a utilizat programul de simulare Matlab Simulink împreună cu libraria de funcții specializate pe modelare 3D şi interacțiune cu mediul de lucru, cu numele de SimMechanics V2. Figura 5.4.7 prezintă structura unui modul din cele trei ale robotului mobil păşitor hexapod simulat.

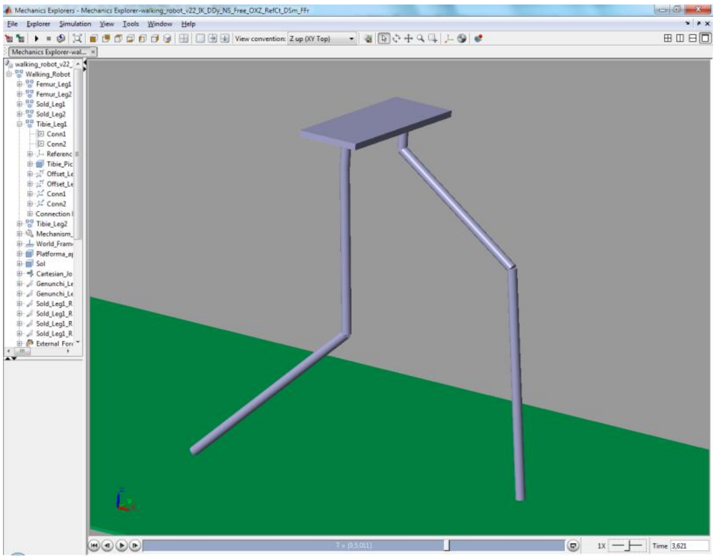


Figura 5.4.7 – Robotul mobil păşitor biped simulat folosind Matlab Simulink – SimMechanics V2

Pentru calcularea forței de frecare, s-au utilizat cercetări publicate în [36, 175]. Formula după care s-au realizat calculele de aflare a forței de frecare este:

$$\sqrt{R_1^2 + R_2^2} = \mu R_3 \qquad (5.4.5)$$

unde, R_1, R_2şi R_3 reprezintă descompunerea pe cele trei axe carteziene a forței cu care greutatea robotului apasă pe suprafața de sprijin. Condiția (5.4.5) reprezintă limita de alunecare pentru respectivul picior.

Figura 5.4.8 exemplifică realizarea simulării robotului mobil păşitor prin implementarea articulației de şold şi a elementelor mecatronice conectate la aceasta, folosind librăria de funcții SimMechanics V2.

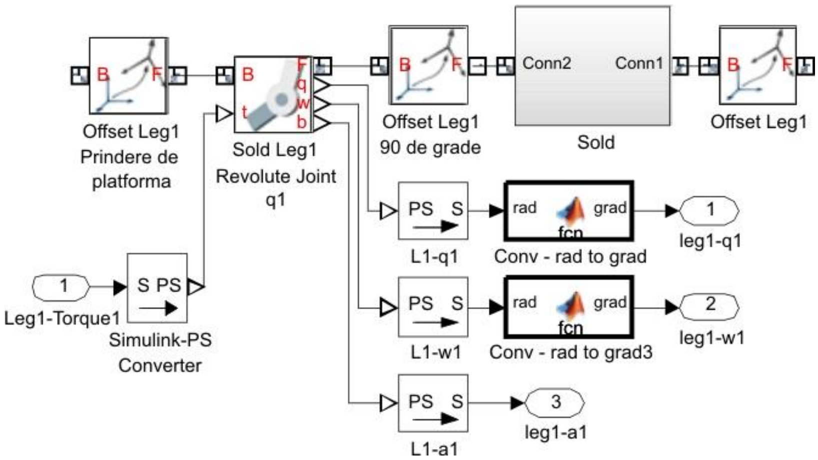


Figura 5.4.8 – Construirea articulației de şold şi a segmentului de şold a piciorului

Contribuțiile cele mai importante ale autorului, introduse de acest capitol sunt: realizarea simulării cu ajutorul librăriei SimMechanics V2 a robotului păşitor biped în mediul virtual dar şi introducerea relațiilor de detecție a contactului cvasi-static şi a calculării forței de frecare necesare pentru simularea deplasării robotului.

Simularea mersului robotului mobil păşitor sub acțiunea controlului hibrid forță-poziție îmbunătățit

Folosind schema de control hibrid îmbunătățit din figura 5.4.2, s-a realizat o simulare de control a robotului mobil păşitor deja prezentat. Legile de control utilizate sunt controlul bazat pe un control cinematic PID şi cel bazat pe schema Fuzzy-PID-SMC, pentru care relația generală de control este:

$$\tau_{ctrl} = \quad S\left[\tau_{prev} + K_p \; q_{ref} - q_{real} \; - \omega_{real} - K_d \alpha_{real}\right] +$$

$$+ \; I - S \; \left[H \;\; \ddot{q}_d + \lambda_1 \dot{e} + \lambda_2 e \; + C\left(\dot{q}_d + \lambda_1 e + \lambda_2 \int_0^t e dt \right) + G + K_v s + K \, sat \;\; s \;\; \right]$$

Aceste legi de control au fost combinate utilizând logica neutrosophică în funcție de datele primite de la senzori. Schema logică de determinare a legii de control care preia comanda fiecărui picior în parte, este cea din figura 5.4.12, iar figura 5.4.40 prezintă diagrama de comandă din timpul simulării de 10 secunde a robotului, în care acesta se deplasează pe direcția de înainte, în care în perioada inițială de 0,5 secunde, robotul este în faza de *homming*.

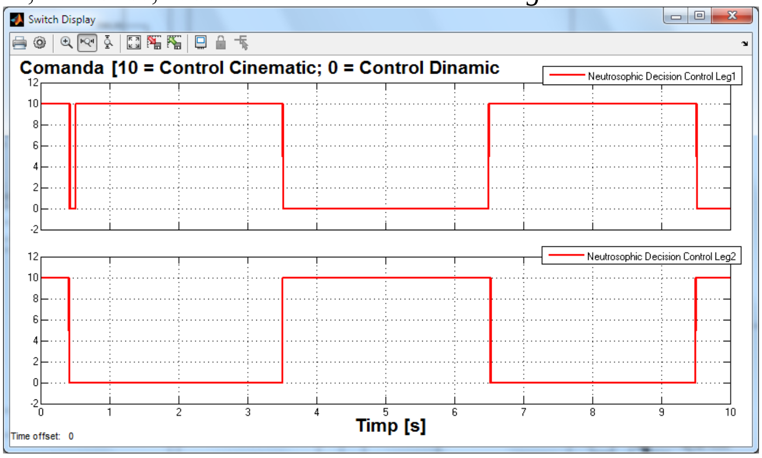


Figura 5.4.40 – Decizia neutrosophică pentru cele două picioare ale robotului

Folosind această decizie, s-au obținut următoarele date de poziționare ale picioarelor robotului mobil păşitor biped, controlat în poziție de un control cinematic şi unul dinamic, alternând între ele folosind logica neutrosophică.

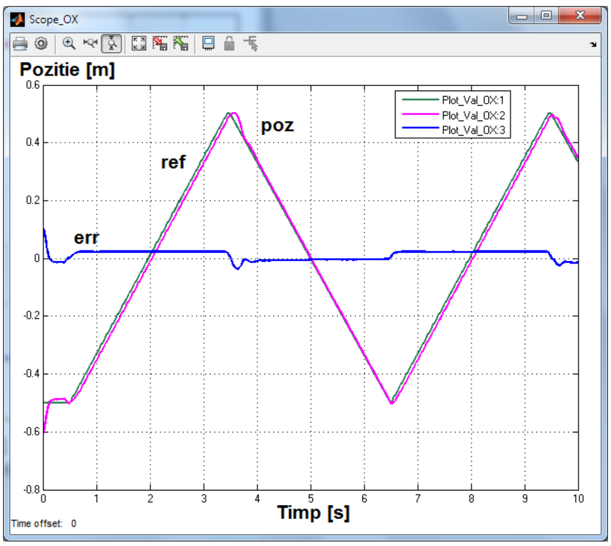


Figura 5.4.41 – Poziționarea piciorului 1 pe axa OX folosind controlul hibrid îmbunătățit

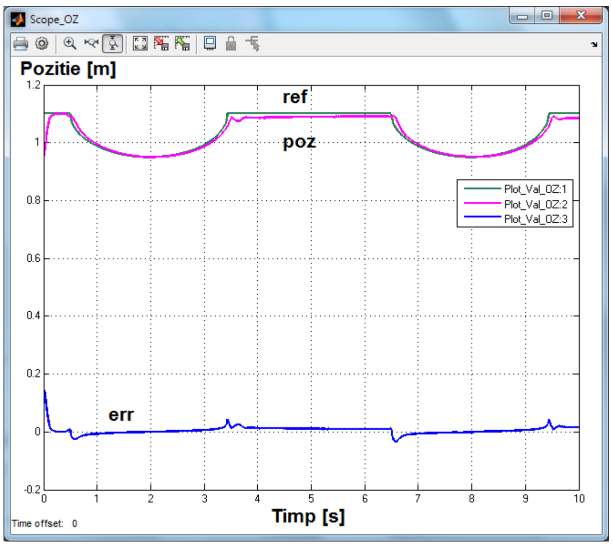


Figura 5.4.43 – Poziționarea piciorului 1 pe axa OZ folosind controlul hibrid îmbunătățit

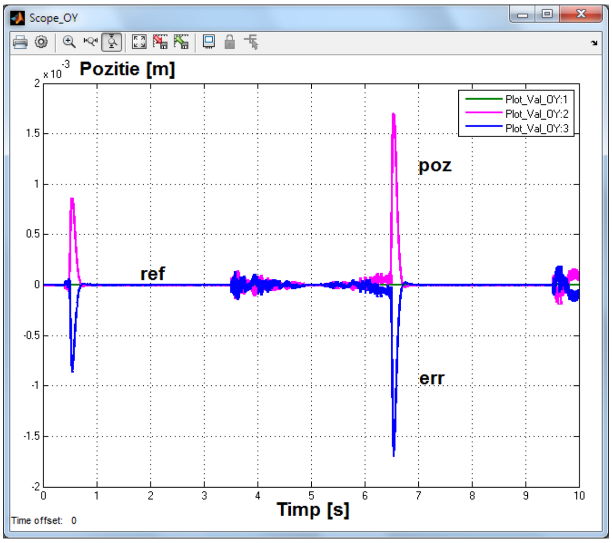


Figura 5.4.42 – Poziționarea piciorului 1 pe axa OY folosind controlul hibrid îmbunătățit

Figurile 5.4.41, 5.4.42 şi 5.4.43 prezintă poziționarea pe cele trei axe ale tălpii piciorului 1 a robotului mobil păşitor biped, fiind similare şi pentru piciorul 2, diferind doar ordinea fazelor de mişcare (pendulare, suport, înaintare). Comparând cu poziționarea controlului cinematic, se observă că în faza de suport a greutății, poziționarea pe direcția OX este micşorată datorită controlului dinamic, iar eroarea pe axa verticală OZ este puțin mai mare, dar constantă. Acest lucru face ca viteza de înaintare să fie cea dorită.

Erorile de poziționare pot fi observate mai bine în figurile 5.4.44 şi 5.4.45.

După cum se observă, eroarea de poziționare se poate spune că este periodică, deoarece prezintă aceeaşi formă pentru fazele repetitive ale mişcării celor două picioare ale robotului mobil păşitor. Se observă că în momentul controlului cinematic, erorile au un caracter asimptotic, iar în fazele de control al mişcării la alunecare, eroarea este constantă pentru ambele articulații 2 şi 3. Acest lucru evidențiază diferențele de poziționare ale celor două legi de control, şi faptul că folosirea controlului mişcării la alunecare este necesară pentru fazele de suport ale platformei robot, pentru ca aceasta să nu devină instabilă din cauza diferenței dintre vitezele de mişcare ale picioarelor sale.

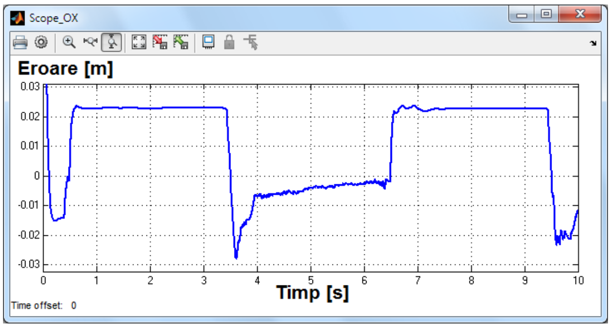


Figura 5.4.44 – Eroarea de poziționare a piciorului 1 pe axa OX folosind controlul hibrid îmbunătățit

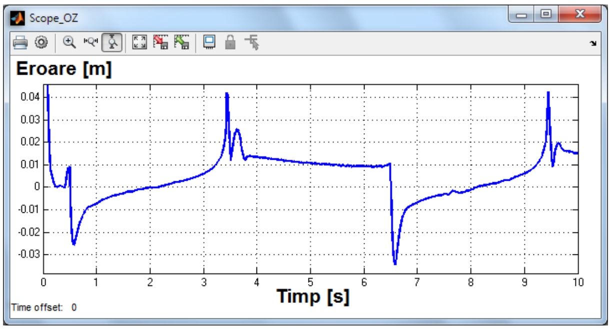


Figura 5.4.45 – Eroarea de poziționare a piciorului 1 pe axa OZ folosind controlul hibrid îmbunătățit

Folosind performanțele de poziționare a celor două tipuri de control utilizate dar şi îmbunătățirile aduse lor se observă că acest tip de control hibrid este unul îmbunătățit şi îmbină eficient performanțele metodelor de control utilizate. Logica neutrosophică utilizată, reuşeşte să furnizeze datele cele mai bune şi la momentele de timp utile, pentru ca schimbarea tipului de control să fie realizată în momentele cele mai prielnice.

Contribuția principală a acestui capitol prin experimentarea virtuală a controlului hibrid îmbunătățit, evidențiază faptul că noua lege de control realizată, este mult mai productivă față de schema clasică de control hibrid, deoarece se pot forma mult mai multe combinații a legilor de control în timpul funcționării robotului. Astfel, la o singură aplicație se poate ajunge la o combinație de scheme de control dată de relația (5.4.8), deoarece fiecare metodă de control, aşa cum este prezentat în

figura 5.4.1, poate să fie utilizată la un anumit moment de timp cu oricâte alte metode, pentru a controla fiecare grad de libertate a robotului.

$$Nr_{comb} = C_{x\ n+m}^{x} \qquad (5.4.8)$$

unde Nr_{comb} reprezintă numărul total de combinații care se pot realiza între legile de control, x reprezintă numărul de grade de libertate ale robotului controlat, iar n şi m reprezintă numărul de metode de control pentru ramura de control în forță şi respectiv poziție.

Analizarea datelor obținute reprezintă o altă contribuție pe care acest capitol le aduce tezei de doctorat. Acest lucru demonstrează faptul că legea de control hibrid îmbunătățit forță-poziție dezvoltată, în combinație cu metoda originală de comutare realizată, bazată pe logica neutrosophică şi teoria DSm, are performanțe superioare în controlul roboților mobili păşitori în raport cu legea clasică de control hibrid şi rezultatele altor echipe de cercetare. Mai mult, s-au realizat analize în spațiul operațional şi cel al articulațiilor evidențiind vârfurile de eroare maximă şi cauzele apariției acestora, pentru ca cercetări ulterioare să le poată diminua şi chiar elimina complet.

Stand de simulare al unui picior al robotului mobil păşitor

În acest capitol este prezentată realizarea unui stand de simulare a unui picior al robotului mobil păşitor pentru a testa o parte din legile de control utilizate în această teză, şi în special legea de control a mişcării la alunecare deoarece aceasta implică multe contribuții originale şi foloseşte teoria dinamicii roboților. Acest stand de teste a fost obținut în urma proiectului de cercetare la care autorul acestei teze de doctorat a participat în colaborare cu Profesorul Luige Vlădăreanu şi dr. ing. Lucian Marius Velea: „Cercetari fundamentale si aplicative pentru controlul hibrid forta-pozitie al robotilor pasitori modulari in sisteme cu arhitectura deschisa”, ID 005/2007-2010. Proiectul a făcut parte din programul IDEI, UEFISCDI, coordonator proiect Prof. Luige Vlădăreanu şi finanțat de către Autoritatea Națională pentru Cercetare Ştiințifică.



Figura 6.1 – Standul de testare al legilor de control

Relația de bază a controlului implementat pe standul de teste din figura 6.1 este:

$$\tau_{ctrl} = SMC\ \ \Delta q, S, K_{fuzzy}, Rob_{Din}\ \ = \left[H\ \ \ddot{q}_d + \lambda_1 \dot{e} + \lambda_2 e\ \ + C\left(\dot{q}_d + \lambda_1 e + \lambda_2 \int_0^t e dt \right) + G + K_v s + K\, sat\ \ s\ \ \right]$$

Această relație foloseşte metoda controlului mişcării la alunecare cu parametrii dinamici, parametrii fuzzy, precum şi parametrii specifici SMC cum ar fi relația care determină suprafața de alunecare.

În realizarea standului de teste s-au utilizat echipamente pentru funcționare în regim industrial, cu automate programabile de control în buclă de reacție şi convertizoare de frecvență ACSM1 pentru conducerea motoarelor.

Utilizând acest stand de încercări, s-a realizat un program de testare a cercetărilor realizate. Dar, deoarece nu s-a dorit simularea componentelor hardware ale roboților, a fost simulată numai metoda de control la alunecare Fuzzy-PID-SMC, pentru un picior cu 2DOF al robotului mobil păşitor. Toți parametrii pentru simulare precum şi semnalele de referință au fost preluate din simulările Matlab anterioare pentru a putea compara rezultatele obținute.

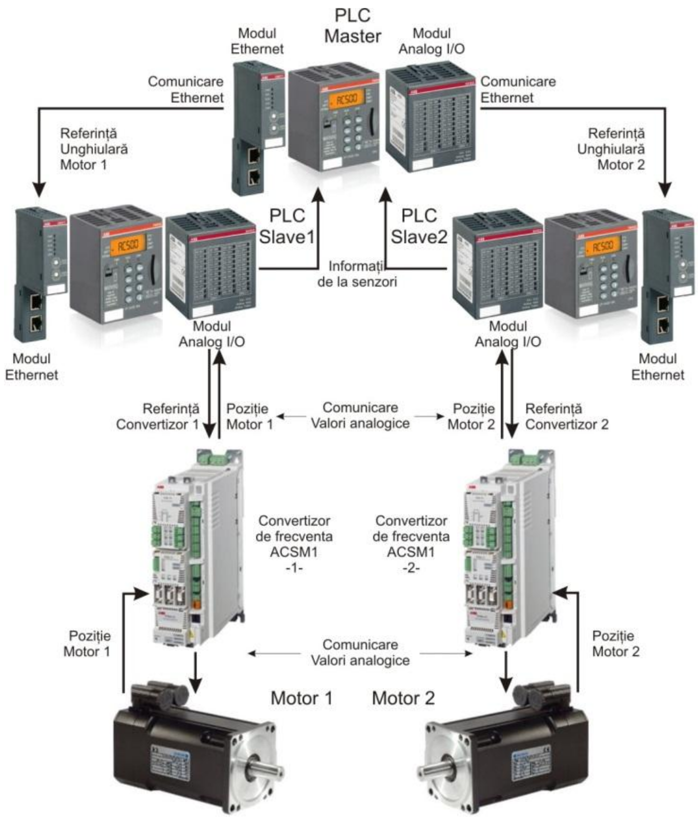


Figura 6.14 – Schema de comandă şi control a standului experimental utilizat

Figura 6.14 prezintă schema de comandă şi control a standului experimental utilizat în realizarea experimentărilor, iar figura 6.15 prezintă rezultatele simulării după implementarea legii de control.

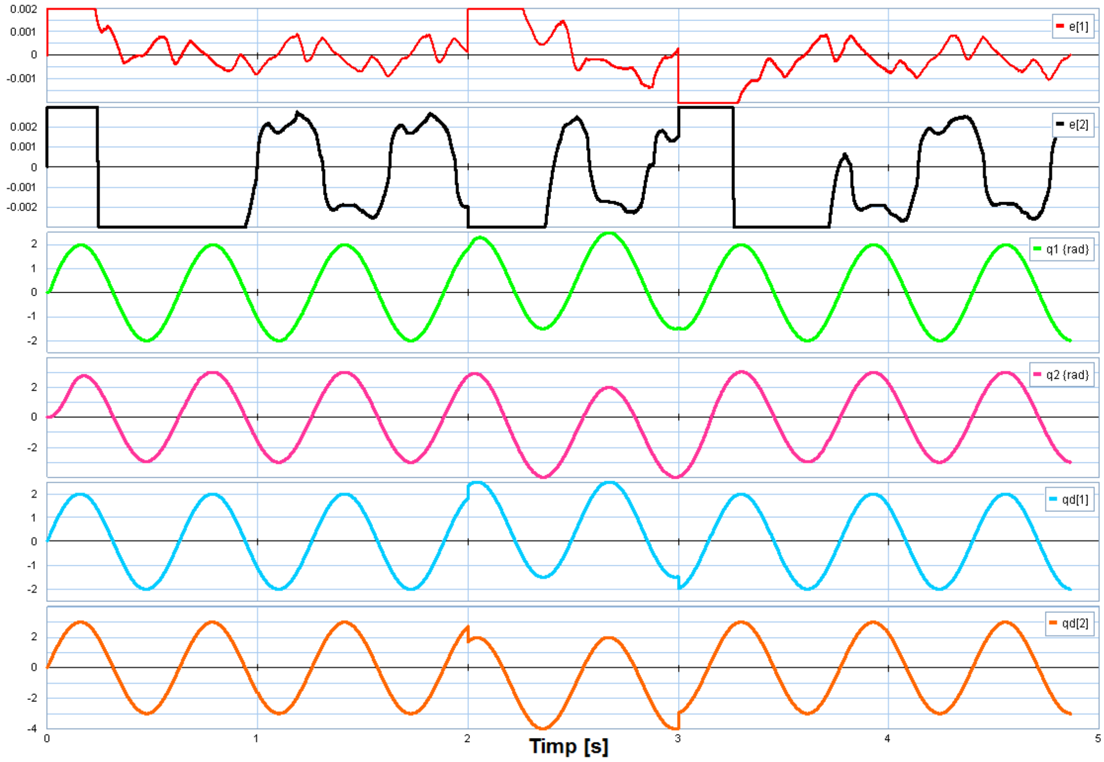


Figura 6.15 – Diagrama de prezentare a semnalelor de referință, urmărire și eroare pentru cele două motoare controlate de metoda Fuzz-PID-SMC

Ca şi în simulările realizate mai devreme, la secunda 2 şi 3 s-a introdus câte o valoare fixă ca semnal de perturbaţie a referinţei, pentru a testa comportamentul sistemului de control în cazul perturbaţiilor exterioare dar şi în cazul generării semnalelor de referinţă rău condiţionate. Astfel, putem observa că eroarea pentru articulaţia 1 ajunge să se stabilizeze în intervalul [-0,001; +0,001] grade iar eroarea pentru articulaţia 2 se stabilizează în intervalul de [-0,0025;+0,0025] grade. Erori mult mai bune faţă de datele obţinute prin experimentare virtuală.

Analizând datele obținute, se observă o îmbunătățire a performanțelor măsurate, față de experimentările simulate cu MatLab Simulink. Aceasta înseamnă că programele de simulare încă mai au probleme de soluționat, iar erorile mai mari obținute în urma simulărilor, se datorează algoritmilor de calcul folosiți în optimizarea ecuațiilor de către platformele de simulare a sistemelor mecatronice.

În concluzie, rezultatele experimentale, s-au dovedit mult mai precise în poziționarea articulațiilor, față de cele obținute prin experimentare virtuală, dovedind utilitatea şi performanțele de nivel ridicat a contribuțiilor aduse metodelor de control.

Prima contribuție pe care acest capitol o scoate în evidență o reprezintă modificarea standului de teste experimentale pentru a îndeplinii condițiile de simulare a unui picior al robotului mobil păşitor. În plus, s-au configurat automatele programabile şi convertizoarele de frecvență pentru a se încadra aplicației realizate.

O altă contribuție este reprezentată de realizarea programelor de comunicație prin intermediul rețelei Ethernet şi a protocolului UDP, dar şi a funcțiilor de calcul a relațiilor matematice care realizează controlul în timp real al motoarelor controlate.

Analiza comparativă şi dovedirea faptului că metoda de control Fuzzy-PID-SMC are rezultate mai bune, ca urmare a testelor experimentale, față de cele obținute prin experimentări virtuale, creşte lista de contribuții personale prezentate în această teză de doctorat.

Contribuții originale şi concluzii

Contribuții originale ale autorului

În urma finalizării cercetărilor descrise în această teză de doctorat, s-au prezentat o serie de soluții originale în domeniul controlului roboților. Dintre cele mai importante contribuții ale autorului în cadrul lucrării de doctorat se menționează următoarele:

1. S-a realizat un studiu comparativ aprofundat din care a rezultat stadiul actual al cercetărilor şi s-a validat faptul că domeniul de cercetare abordat este unul de interes major, care se regăseşte în preocupările marilor universități şi centre de cercetare din întreaga lume.
2. S-a conceput, testat şi implementat o nouă schemă de control hibrid forță/poziție bazată pe metoda de control în timp real DHFPC cu aplicarea logicii neutrosophice în selecția optimă a legilor de control a mişcării robotului, printr-o tehnică de comutare originală dezvoltată de autor, care conduce la creşterea performanțelor mişcării şi a îmbunătățirii stabilității roboților mobili pe terenuri denivelate şi nestructurate.
3. S-a conceput o metodă de comutare originală care utilizează logica neutrosophică şi teoria DSm pentru ca apoi să fie utilizată în:
   - controlul roboților mobili păşitori îmbunătățind percepția mediului în care aceştia se deplasează;
   - implementarea unui algoritm bazat pe această metodă care perminte detecția stărilor robotului mobil păşitor în timpul deplasării acestuia.
4. S-au realizat modelări şi simulări ale roboților mobili folosind:
   - mediul de lucru Matlab Simulink şi librăria de funcții SimMechanics V2, rezultând un mediu de teste extrem de realist care a reuşit să evidențieze contribuțiile aduse legilor de control;
   - grafurile Bond, care permit verificarea legilor de control realizate şi îmbunătățite, folosind unelte de simulare avansate.
5. S-au crescut semnificativ precizia de poziționare şi robustețea controlului mişcării la alunecare a roboților mobili, prin:
   - Utilizarea logicii fuzzy pentru a calcula parametrii de amplificare a controlului mişcării la alunecare, rezultând controlul Fuzzy-PID-SMC;
   - Implementarea unei funcții liniare de fuzificare/defuzificare pentru controlul eficient al roboților mobili păşitori;
   - Dezvoltarea relației de calcul a suprafeței de alunecare pentru o eliminare cât mai bună a perturbațiilor, reducând componenta integrativă a acesteia, după o funcție de saturație.
6. Pornind de la condițiile de stabilitate ale roboților mobili păşitori controlați de legi de control DHFPC s-au studiat şi obținut anumite condiții de stabilitate ale robotului, care au fost testate prin simulări virtuale:
   - Prin studierea contactului elastic 3D dintre roboții mobili păşitori şi suprafețele de sprijin, s-au determinat momentele critice pentru care picioarele roboților mobili ajung în starea cvasi-stabilă în care aceştia pot părăsii condițiile de stabilitate, alunecând;
   - Analizând metode de ocolire a obstacolelor, s-au definit condițiile de stabilitate pe care un robot mobil păşitor trebuie să le îndeplinească atunci când este necesar ca robotul să se deplaseze pe traiectorii de ocolire, în cazurile de cooperare cu alți roboți, atunci când face parte dintr-o structură de robot hexapod, sau diferite cazuri de constrângere în timpul deplasării.
7. S-au realizat numeroase experimente virtuale pentru:
   - Testarea contribuțiilor aduse legilor de control;
   - Ajustarea optimă a parametrilor legilor de control, folosind relațiile de calcul dezvoltate;
   - Testarea performanțelor controlul hibrid forță-poziție;
   - Testarea performanțelor controlului mişcării la alunecare;
   - Îmbunătățirea legilor fuzzy de calculare a amplificărilor;
   - Îmbunătățirea şi testarea rigurpasă a algoritmilor de calcul a cinematicii şi dinamicii inverse.
8. S-au realizat experimentări folosind un stand de teste prin care s-a demonstrat îmbunătățirea performanțelor de precizie, stabilitate şi robustețe a legilor de control a mişcării roboților mobili, comparativ cu rezultatele obținute prin experimentare virtuală.
9. S-au realizat şi implementat pe standul de teste:
   - programele de comunicație prin intermediul rețelei Ethernet şi a protocolului UDP;
   - funcțiile de calcul şi relațiile matematice a controlului în timp real al motoarelor controlate, utilizate în standul de simulare realizat;

- configurarea corespunzătoare a automatelor programabile şi a convertizoarelor de frecvenţă pentru a controla în mod corespunzător motoarele care simulează articulaţiile robotului mobil păşitor.

Rezultate obţinute şi diseminarea rezultatelor

Pe baza rezultatelor cercetărilor realizate, autorul a elaborat, susţinut şi publicat un număr de 24 lucrări ştiinţifice în domeniul tezei. Din totalul lucrărilor, 6 au fost publicate ca prim autor în cadrul unor manifestări ştiinţifice naţionale şi internaţionale de prestigiu precum şi în reviste de specialitate, două lucrări au fost publicate în revista Revue Roumaine Des Sciences Techniques - Série de Mécanique Appliquée a Academiei Române, trei lucrări indexate ISI Proceedings, susţinute la University of Houston-Downtown, la conferinţa 15th International Conference on Systems din Corfu Grecia şi la conferinţa 9th International Conference on Applications of Electrical Engineering din Penang Malaezia, a elaborat ca prim autor o lucrare în curs de publicare la revista Revue Roumaine des Sciences Techniques Série Électrotechnique et Énergétique, indexată ISI cu factor de impact şi o lucrare acceptată la conferinţa IMCERA 2013, precum şi 10 lucrări în conferinţe organizate sub egida Academiei Române. Vizibilitatea cercetărilor este dovedită prin publicarea în comun a numeroase lucrări cu autori din ţară şi străinătate precum ***Prof. Hongnian Yu*** [37, 181] de la Universitatea Bournemouth UK, ***Prof. Mingcong Deng*** [175, 181] de la Tokyo University of Agriculture and Technology Japonia, ***Prof. Radu Ioan Munteanu***, de la Universitatea Tehnica din Cluj-Napoca [36, 49], ***Prof. Ovidiu I. Sandru, Prof. Nicolae Pop*** [38, 175] de la Universitatea din Baia Mare.

Nivelul ştiinţific ridicat al cercetărilor efectuate a fost accentuat prin ***contractul de colaborare cu University of New Mexico - Gallup SUA***, coordonat de Profesorul Florentin Smarandache, fondatorul teoriei neutrosophice şi autorul teoriei Dezert Smarandache (DSm) şi ***colaborările internaţionale de cercetare aplicativă în cadrul proiectului european FP7, IRSES***, RABOT „Real-time adaptive networked control of rescue robots” cu ***Bournemouth University din UK,*** coordonator de proiect, partenerii de proiect ***Staffordshire Universitz din UK, Shanghai Jiao Tong University China, Institute of Automation Chinese Academy of Sciences China, Yanshan University din China.***

De remarcat ***cercetările dezvoltate în colaborare cu universităţi din străinătate*** precum University of New Mexico - Gallup SUA; Universitatea Autonomă din Mexico City, Mexic şi University of Houston-Downtown SUA, susţinute de proiectul de cercetare „Cercetări fundamentale şi aplicative pentru controlul hibrid forţă-poziţie al roboţilor păşitori modulari în sisteme cu arhitectură deschisă”, ID 005/2007-2010, Programul IDEI, PN II finantat de ANCS.

Rezultatele obţinute, superioare unor cercetări actuale publicate în reviste recunoscute, indexate BDI sau ISI, sunt relevate în prezenta lucrare prin conceptele originale, validate prin simulari şi experimentări, recunoscute pe plan naţional şi internaţional prin publicarea rezultatelor cercetărilor în conferinţe internaţionale la Harvard, Houston, Paris, Bucureşti, în reviste indexate în BDI și ISI, dar și prin ***premii naţionale şi internaţionale, medalii de aur*** acordate la Expoziţiile Internaţionale din ***Geneva 2010, Moscova 2010, Bucureşti 2010, Varşovia 2009***.

Bibliografie selectivă

[7] F. Smarandache, L. Vladareanu, „Applications of neutrosophic logic to robotics: An introduction”, in Proc. GrC, 2011, pp.607-612.

[8] Florentin Smarandache, „A Unifying Field in Logics: Neutrosophic Field, Multiple-Valued Logic / An International Journal”, Vol. 8, No. 3, 385-438, June 2002.

[9] M.H. Raibert, J.J. Craig, „Hybrid Position/Force Control of Manipulators”, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control Vol 102/127, 1981.

[36] Alexandru Gal, Radu Ioan Munteanu, Octavian Melinte, Luige Vladareanu, „A New Approach of Sliding Motion Robot Control using Bond Graph”, The 8th INTERNATIONAL Symposium On Advanced Topics In Electrical Engineering May 23-25, 2013, Editura Printech, ISSN: 2068-7966, Bucureşti, Romania.

[37] Alexandru Gal, Luige Vladareanu, Hongnian Yu, „Applications of Neutrosophic Logic Approaches in ”RABOT” Real Time Control”, SISOM 2013 and Session of the Commission of Acoustics, Bucharest 25-26 May 2013.

[38] Nicolae POP, Luige VLADAREANU, Alexandru GAL, “The extension real time control method for restoring the robot equilibrium position”, Proceedings of the 1st International Conference on Mechanical and Robotics Engineering (MREN '13), WSEAS 2013, pp. 137-142, ISBN: 978-1-61804-185-2, Athens, Greece 2013.

[39] Octavian MELINTE, Luige VLADAREANU, Alexandru GAL, „Performances of a haptic device when compensating for dynamic parameters”, SISOM 2012 and Session of the Commission of Acoustics, Bucharest 25-26 May 2012.

[40] Alexandru GAL, Luige VLADAREANU, Mihai S. Munteanu, Octavian MELINTE, „PID sliding motion control by using fuzzy adjustment”, SISOM 2012 and Session of the Commission of Acoustics, Bucharest 25-26 May 2012.

[41] Luige Vladareanu, Alexandru Gal, „A Multi-Functionl Approach of the HFPC Walking Robots”, Proceedings of the 15th WSEAS International Conference on Systems (part of the 15th WSEAS CSCC multiconference), Recent Researches in System Science, Corfu Island, Greece, July 14-16, 2011, pag: 339-345, ISBN: 978-1-61804-023-7, ISSN: 1792-4235.

[42] Alexandru Gal, „Hybrid force-position control for manipulators with 4 degrees of freedom”, Proceedings of the 15th WSEAS International Conference on Systems (part of the 15th WSEAS CSCC multiconference), Recent Researches in System Science, Corfu Island, Greece, July 14-16, 2011, pag: 358-363, ISBN: 978-1-61804-023-7, ISSN: 1792-4235.

[43] Octavian Melinte, Alexandru Gal, „Bond graph modelling for haptic interface robot control”, Proceedings of the European Computing Conference (ECC ’11), Paris, France, April 28-30, 2011, pag: 364-369, ISBN: 978-960-474-297-4.

[44] Octavian Melinte, Luige Vladareanu, Alexandru Gal, „Improvement of Robot Stability for Robots with Variable Dimensions”, Proceedings of the XXIst SISOM, Bucharest 27-28 May 2010, ISSN 2068-0481.

[45] Alexandru Gal, Luige Vladareanu, Octavian Melinte, „Modular Walking Robots Control For Circular Movement Around Its Own Axis”, Proceedings of the XXIst SISOM, Bucharest 27-28 May 2010, ISSN 2068-0481.

[46] Luige Vladareanu, Gabriela Tont, Ion Ion, Lucian M. Velea, Alexandru Gal, Octavian Melinte, „Fuzzy Dynamic Modeling for Walking Modular Robot Control”, Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on Applications of Electrical Engineering (AEE ’10), Penang, Malaysia, March 23-25, 2010, pag:163-170, ISBN: 978-960-474-171-7, ISSN: 1790-2769.

[48] Luige Vladareanu, Ion Ion, Lucian M. Velea, Daniel Mitroi, Alexandru Gal, „The Real Time Control of Modular Walking Robot Stability”, ISI Proceedings of the 8th International Conference on Applications of Electrical Engineering (AEE ’09), Houston, USA, pag. 179-186, ISSN: 1790-5117, ISBN: 978-960-474-072-7.

[56] „Metodă şi Dispozitiv pentru Controlul Dinamic al Roboților Păşitori”, PATENT: OSIM A/00052/21.01.2010, autori: Luige Vladareanu, Lucian Marius Velea, Radu Adrian Munteanu, Tudor Sireteanu, Mihai Stelian Munteanu, Gabriela Tont, Victor Vladareanu, Cornel Balas, D.G. Tont, Octavian Melinte, Alexandru Gal.

[57] “Metodă şi Dispozitiv pentru controlul extins hibrid forță/poziție al sistemelor robotice şi mecatronice”, PATENT: OSIM A2012 1077/28.12.2012, autori: Luige Vladareanu, Cai Wen, R.I. Munteanu, Yan Chuyan, Alexandru Gal.

[58] Vladareanu, L., Tont, G., Ion, I., Vladareanu, V., & Mitroi, D. (2010, January). „Modeling and hybrid position-force control of walking modular robots”. In American Conference on Applied Mathematics, pg (pp. 510-518).

[59] Vladareanu, L., Tont, G., Ion, I., Munteanu, M. S., & Mitroi, D. (2010). „Walking robots dynamic control systems on an uneven terrain”. Advances in Electrical and Computer Engineering, ISSN, 1582-7445.

[60] Vladareanu, L. (2006). „Open architecture systems for the compliance robots control”. WSEAS Transactions on Systems, 5(9), 2243-2249.

[62] Vladareanu, L., Ion, I., Velea, L. M., & Mitroi, D. (2009). „The robot hybrid position and force control in multi-microprocessor systems”. WSEAS Transactions on Power Systems, (1), 148-157.

[63] Ion, I., Vladareanu, L. Radu Muntanu jr., Mihai Munteanu, „The Improvement of Structural and Real Time Control Performances for MERO Modular”, Advances in Climbing and Walking Robots, Ed. Ming Xie, S. Dubowsky.

[69] Vladareanu, L., Ion, I., Diaconescu, E., Tont, G., Velea, L. M., & Mitroi, D. (2008, November). „The hybrid position and force control of robots with compliance function”. In Proceedings of the 10th WSEAS international conference on Mathematical and computational methods in science and engineering (pp. 384-389). World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS).

[72] Vladareanu, L., & Capitanu, L. (2012). „Hybrid Force-Position Systems With Vibration Control For Improvment Of Hip Implant Stability”. Journal of Biomechanics, 45, S279.

[75] Haibin Wang, Florentin Smarandache, Yan-Quin Zhang, Rajshekhar Sunderraman, „Interval Neutrosophic sets and logic: Theory and application in computing.”, HEXIS Neutrosophic Book Series, No.5, 2005.

[76] Florentin Smarandache, “Neutrosophy : neutrosophic probability, set, and logic ; analytic synthesis & synthetic analysis”, Gallup, NM : American Research Press, 1998. - 105 p., ISBN 1-87958-563-4.

[77] F. Smarandache, L. Vladareanu, "Applications of neutrosophic logic to robotics: An introduction", in Proc. GrC, 2011, pp.607-612.

[78] Xinde Li, Xinhan Huang, Jean Dezert, Li Duan and Min Wang, „A Successful Application of DSmT in Sonar Grid Map Building And Comparison With Dst-Based Approach”, International Journal of Innovative Computing, Information and Control ICIC International, Volume 3, Number 3, ISSN 1349-4198, June 2007.

[79] Editori Florentin Smarandache si Jean Dezert, „Advances and Applications of DSmT for Information Fusion”, Editura: American Research Press, Rehoboth, 2004, ISBN: 1-931233-82-9.

[80] Utkin, V. I., „Sliding Modes and their Application in Variable Structure Systems”, MIR Publishers, Moscow (1978).

[81] Zhang, M., Yu, Z., Huan, H. & Zhou, Y., „The Sliding Mode Variable Structure Control Based on Composite Reaching Law of Active Magnetic Bearing”, ICIC Express Letters, vol.2, no.1, pp.59-63, (2008)

[119] Gal I. Alexandru, Referatul 2 „Strategii de Control Hibrid Forță-Poziție a Roboților Mobili Utilizând Modelarea Dinamică” din programa de studii doctorale, Aprilie 2011.

[135] Mohamed El Hossine Daachi, Brahim Achili, Boubaker Daachi, Yacine Amirat, Djamel Chikouche, „Hybrid Moment/Position Control of a Parallel Robot”, International Journal of Control, Automation, and Systems, Springer (2012, DOI 10.1007/s12555-012-0310-z, ISSN:1598-6446 eISSN:2005-4092.

[137] M. Farooq and D. B. Wang, “Hybrid force/position control scheme for flexible joint robot with friction between and the end-effector and the environment,” International Journal of Engineering Science, vol. 46, no. 12, pp. 1266-1278, Dec. 2008

[138] S. Kilicaslan, M. K. Özgören, and S. K. Ider, “Hybrid force and motion control of robots with flexible links,” Mechanism and Machine Theory, vol. 45, no. 1, pp. 91-105, 2010.

[139] A. Visioli, G. Ziliani, G. Legnani, and S. Özgören. “Iterative-learning hybrid force/velocity control or contour tracking,” IEEE Trans. on Robotics, vol. 26, no. 2, pp. 388-393, 2010.

[140] N. Kumar, V. Panwar, N. Sukavanam, S. P. Sharma, and J. H. Borm, “Neural network based hybrid force/position control for robot manipulators,” International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, vol. 12, no. 3, pp. 419-426, 2011.

[141] Javier Testart, Javier Ruiz del Solar, Rodrigo Schulz, Pablo Guerrero, Rodrigo Palma-Amestoy, „A Real-Time Hybrid Architecture for Biped Humanoids with Active Vision Mechanisms”, Journal of Intell Robot Syst, pp:233–255, DOI 10.1007/s10846-010-9515-7, Springer 2011, ISSN: 0921-0296.

[142] Cetin Elmas, Oguz Ustun, „A hybrid controller for the speed control of a permanent magnet synchronous motor drive”, Control Engineering Practice 16, pp.260–270 ISSN: 0967-0661, Elsevier 2008, doi:10.1016/j.conengprac.2007.04.016.

[144] Bora Erginer şi Erdinc Altug, „Design and Implementation of a Hybrid Fuzzy Logic Controller for a Quadrotor VTOL Vehicle”, International Journal of Control, Automation, and Systems (2012) 10(1):61-70, DOI 10.1007/s12555-012-0107-0, ICRSO, KIEE, Springer 2012.

[145] Naveen Kumar, Vikas Panwar, Nagarajan Sukavanam, Shri Prakash Sharma, Jin-Hwan Borm, „Neural Network Based Hybrid Force/Position Control for Robot Manipulators”, International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing Vol. 12, No. 3, pp. 419-426, DOI: 10.1007/s12541-011-0054-3, Springer 2011.

[147] Çetin Saban, Akkaya AliVolkan, „Simulation and hybrid fuzzy-PID control for positioning of a hydraulic system”, Nonlinear Dynamics 61, pp:465–476, DOI: 10.1007/s11071-010-9662-1, Springer 2010.

[151] Farzin Piltan, N. Sulaiman, Samaneh Roosta, M.H. Marhaban, R. Ramli, „Design a New Sliding Mode Adaptive Hybrid Fuzzy Controller”, Journal of Advanced Science and Engineering Research, pp: 115-123, 2011.

[155] Swandito Susanto, Sunita Chauhan, „A Hybrid Control Approach for Non-invasive Medical Robotic Systems”, Journal of Intelligent & Robotic Systems, pp: 83-110, ISSN: 0921-0296, DOI: 10.1007/s10846-010-9407-x, Springer 2010.

[156] Zahari Taha, Sarkawt Rostam, „A hybrid fuzzy AHP-PROMETHEE decision support system for machine tool selection in flexible manufacturing cell”, Journal of Intelligent Manufacturing, ISSN: 0956-5515, DOI: 10.1007s10845-011-0560-2, Springer 2012.

[158] Editor: Seyed Ehsan Shafiei, „Advanced Strategies for Robot Manipulators”, ISBN 978-953-307-099-5, Croația, 2010.

[159] Florentin Smarandache, M. Khoshnevisan, „Fuzzy Logic, Neutrosophic Logic, and Applications”, BISC FLINT-CIBI International Joint Workshop on Soft Computing for Internet and Bioinformatics, Berkeley, California, USA, 2003.

[160] Wen, Shuhuan, et al. "Elman fuzzy adaptive control for obstacle avoidance of mobile robots using hybrid force/position incorporation." Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on 42.4 (2012): 603-608.

[161] Vladareanu, Luige, et al. "Modeling and hybrid position-force control of walking modular robots." American Conference on Applied Mathematics, pg. 2010.

[162] Bellakehal, Saliha, et al. "Force/position control of parallel robots using exteroceptive pose measurements." Meccanica 46.1 (2011): 195-205.

[163] Vladareanu, Luige, Victor Vladareanu, and Florentin Smarandache. "Extension Hybrid Force-Position Robot Control in Higher Dimensions." Applied Mechanics and Materials 332 (2013): 260-269.

[164] Zheng, Chi-Han. "A Study of Hybrid Position/Impedance Control Applied to Peg-In-Hole Task with Robot Arm." (2013).

[165] Rakotondrabe, Micky, and Ioan Alexandru Ivan. "Development and force/position control of a new hybrid thermo-piezoelectric microgripper dedicated to micromanipulation tasks." Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on 8.4 (2011): 824-834.

[166] Marconi, Lorenzo, and Roberto Naldi. "Control of aerial robots: Hybrid force and position feedback for a ducted fan." Control Systems, IEEE 32.4 (2012): 43-65.

[167] Rabenorosoa, Kanty, Cédric Clévy, and Philippe Lutz. "Active force control for robotic micro-assembly: Application to guiding tasks." Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on. IEEE, 2010.

[168] Visioli, Antonio, Giacomo Ziliani, and Giovanni Legnani. "Iterative-learning hybrid force/velocity control for contour tracking." Robotics, IEEE Transactions on 26.2 (2010): 388-393.

[169] Liu, Yong, et al. "Development of a hybrid position/force controlled hydraulic parallel robot for impact treatment." Service Robotics and Mechatronics. Springer London, 2010. 61-67.

[170] Mehdi, Haifa, and Olfa Boubaker. "Rehabilitation of a human arm supported by a robotic manipulator: A position/force cooperative control." Journal of Computer Science 6.8 (2010): 912.

[171] Kilicaslan, Sinan, M. Kemal Özgören, and S. Kemal Ider. "Hybrid force and motion control of robots with flexible links." Mechanism and Machine Theory 45.1 (2010): 91-105.

[172] Buschmann, Thomas, Sebastian Lohmeier, and Heinz Ulbrich. "Biped walking control based on hybrid position/force control." Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2009.

[175] Luige Vladăreanu, Nicolae Pop, Alexandru Gal, Mingcong Deng, „The 3D elastic quasi-static contact applied to robots control”, International Conference on Advanced Mechatronic Systems, Henan University of Science and Technology, Luoyang, China, 2013.

[181] Ionel Alexandru Gal, Luige Vladareanu, Florentin Smarandache, Hongnian Yu, Mingcong Deng, „Neutrosophic Logic Approaches Applied to Robot Real Time Control”, International Conference on Aerospace, Robotics, Biomechanics, Neurorehabilitation, Human motricities, Mechanical Engineering and Manufacturing Systems ICMERA 2013, 24-27 Octombrie, invited paper.

[195] Smarandache, F., & Vlădăreanu, V. (2012). Applications of Extenics to 2D-Space and 3D-Space, viXra. org.

[208] Alexandru Gal , Luige VLADAREANU , Radu I. MUNTEANU, „Sliding Mode Control with Bond Graph Modeling Applied on Robot Leg”, Rev. Roum. Sci. Techn.–Électrotechn. et Énerg., vol. 58, no 2, p, Bucureşti, 2013, Indexata ISI, ISSN: 0035-4066, în curs de publicare.